

# 白鑄鉄の凝固組織とサンドエロージョンに関する研究

著者	宇佐美 正
号	467
発行年	1979
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/11416">http://hdl.handle.net/10097/11416</a>

氏 名	宇佐美 正
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和 54 年 12 月 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最終学歴	昭和 31 年 3 月 秋田大学鉱山学部冶金学科卒業

学位論文題目 白鑄鉄の凝固組織とサンドエロージョンに関する研究

論文審査委員 東北大学教授 大平 五郎 東北大学教授 島田 平八  
東北大学教授 西沢 泰二

## 論文内容要旨

白鑄鉄は、その組織中に硬い炭化物が多量に存在するため、耐摩耗性を要する機械部品として広く用いられ、特に高クロム白鑄鉄(12～35% Cr)は、クロム含有量が多いので、硬さのほか、耐食性や耐酸化性にもすぐれ、摩耗条件によっては、鋼系材料にまさるともいわれる。いずれにしても、工業材料としての白鑄鉄は、化学組成、凝固条件及び熱処理によって得られる組織と密接な関係がある。したがって、白鑄鉄を取扱う場合はもとより、その材質の改善をはかる場合には、それぞれの組織について、その生成過程を明らかにすると共に、各影響因子についても、じゅうぶんな理解が必要である。ところが、これまで白鑄鉄の凝固組織に関する系統的で、しかも詳細な研究報告は少なかった。それには、白鑄鉄における炭化物の結晶学的な特性や、レデブライト共晶組織が化学組成や凝固条件によって影響され易く、複雑であることも原因していたものと考えられる。

本研究では、試料を一方向凝固の方法で調整することにより、白鑄鉄の凝固組織の立体的な構造、及び化学組成や凝固条件との定量的な関係の検討を試みた。

さて、はじめにも述べたように、耐摩耗材料としての白鑄鉄は、鉱山あるいは土木機械などの土砂や岩石などを相手とする苛酷な摩耗をうける部品として用いられることが多い。このような摩耗、特に砂や泥などの固形物を含む流体による摩耗として知られるサンドエロージョンについては材料の凝固組織や耐食性との関係を指摘されながらも、その摩耗機構が複雑なため、従来の

研究では不明な点が多かった。

以上から、本研究は、白鑄鉄の凝固組織と熱処理や凝固条件などとの関係を明らかにすると共に、これらの各組織とサンドエロージョンとの関係を摩耗面の現象に重点をおいて検討し、その摩耗機構の解明と耐摩耗性の改善をはかることを目的に行なわれたものである。

本論文は、これらをまとめたもので、全編8章よりなる。

## 第1章 緒 論

本章では、工業材料としての白鑄鉄の特性及び問題点を指摘すると共に、これらに関する従来の研究を概説し、本研究の目的と意義を述べた。

## 第2章 白鑄鉄の一方向凝固組織

本章では、白鑄鉄の凝固組織に関する研究と一方向凝固との関係あるいは特徴を、各組成白鑄鉄の凝固組織について広く検討した。すなわち、白鑄鉄に含まれる炭化物は、結晶学的な特性として異方性のある成長をするため、その凝固組織は断面によって異なるなど複雑で、例えば、レデブライト共晶組織にしても、ねずみ鑄鉄における共晶セルのようなかたちで問題にされることはなかった。しかし、本研究において、一方向凝固の方法をとり入れたことから、レデブライト共晶組織を共晶セルを単位に、化学組成や凝固速度と関連させて定量的に検討することが可能となった。その結果、Fe-C合金試料のレデブライト共晶は lamellar 組織を形成するが、これにCrを添加(6% Crまで)した場合や市販の球状黒鉛鑄鉄用銑鉄を基材とした合金試料では、rod-like 組織となること、及びレデブライト共晶セルの境界には黒鉛のあらわれ易いことなどについて、凝固速度と関連させて比較できた。その他、異方性のあるデンドリチックな板状晶として成長する初晶炭化物の立体的な形状や初晶のオーステナイトあるいは炭化物とレデブライト共晶組織との相互関係についても理解し易くなった。また、白鑄鉄は、初晶炭化物やレデブライト共晶セルの立体的な形状(板状あるいは扁平)から、その凝固方向によって鑄物表面の凝固組織が特徴づけられることがわかった。

## 第3章 一方向凝固した白鑄鉄の凝固組織と化学組成及び凝固条件との関係

本章では、Crのほかの白銑化促進元素として知られているMn, S, 及びMoなどを添加した白鑄鉄についても、凝固組織に与える影響を凝固速度と関連させて定量的に検討し、lamellar, rod-like 及びmassive ladeburiteの各共晶組織形成との関係やレデブライト共晶セル幅に与える影響を明らかにした。また、試料の化学組成が同じでも、凝固速度や温度勾配の適切な調整によって、凝固組織を変えることが可能であり、例えば、試作した一方向凝固装置を用いて凝固速度を11.3 mm/hr以下にすることで、Fe-C-3% Cr合金及びこれにNiを添加した試料のレデブライト共晶組織を、共晶セル断面がrod-likeから菊の花模様に似た組織まで変化させることができた。そして、この組織が、高クロム白鑄鉄の共晶組織と類似性のあることから、15% Cr白鑄鉄について、凝固組織と外部応力によるクラックの発生や伝播などの相互関係を調べ、

凝固組織と機械的性質の関係についても検討した。

#### 第4章 亜共晶組成白鑄鉄における初晶オーステナイト及びレデブライト共晶セル組織

亜共晶組成白鑄鉄における初晶オーステナイトは、他の金属あるいは合金と同様、基地組織としてのほか、樹枝状晶としての大きさや形状が、マクロあるいはミクロ偏析及び樹枝状間隙の湯流れなどとも関連して問題となる。一方、レデブライト共晶セル組織もまた単位結晶粒としての大きさ、形状及び組織構造が材質との関係から重要な意義をもつものと考えられる。そこで、本章では、白鑄鉄の合金元素としては一般的な、Cr, Ni, Mo, W, Alなどを添加した場合に、初晶オーステナイト及びレデブライト共晶セル幅に与える影響について検討した。すなわち、亜共晶組成白鑄鉄における初晶オーステナイトデンドライトの3次アーム間隔は、Cr, Mo, W, Alなどの添加量が増加するほど減少の傾向を示し、その程度はCrが最も大きい。これに対してNiの添加では、逆の傾向があらわれた。これには、オーステナイトに対する各元素の分配係数の差が関係するものと考えられる。レデブライト共晶セル幅は、Cr, Ni, Alなどの添加量が多いほど大きくなった。これには、rod-like共晶組織の構造的な変化が関係した。0.2% Tiの添加は、初晶オーステナイトデンドライトの3次アーム間隔及びレデブライト共晶セル幅を共に減少させた。そして、これらのいずれもが、試料の凝固速度の平方根に逆比例して変化し、凝固速度の減少にしたがって大きくなった。レデブライト共晶セル幅は、C量によっても影響され、一般的には、C量の高い試料ほど大きくなった。ただし、亜共晶組成白鑄鉄でも、初晶量が増加すれば、初晶の晶出によって周辺融液中には、オーステナイトに対する分配係数の小さいCr、及びCが濃縮されるため局部的に過共晶組成となり、初晶炭化物を中心に成長する過共晶型の共晶セル組織のあらわれる場合がある。これは、レデブライト共晶セル幅とC量との関係特徴的なものとした。

初晶オーステナイトとレデブライト共晶組織との相互関係には興味深いものが多く、例えば、亜共晶組成白鑄鉄におけるレデブライト共晶セル集団は、共晶凝固時、初晶オーステナイトの表面に「筋状」に形成する共晶炭化物の成長方向と関係があるものと考えられ、また、初晶基地中あるいは初晶と共晶組織の境界に析出する初析セメントイトの成長方向は、初晶オーステナイト周辺にあるレデブライト共晶セルの長軸方向と同じ場合の多いことが確かめられた。共晶に近い亜共晶組成白鑄鉄では、レデブライト共晶セルの凝固過程で、C量の変化によって共晶セル中央部から初晶オーステナイトの成長する場合があり、このときの初晶デンドライトは極めて特徴ある形状を呈した。

#### 第5章 白鑄鉄の凝固組織とサンドエロージョンとの関係

金属あるいは合金の磨耗で、腐食をともしない場合が極めて少ない。corrosiveな要素の多い磨耗にサンドエロージョンがあり、その耐磨耗性は凝固組織への依存性が大きいともされている。本章では、これまでに述べた白鑄鉄の凝固組織に関する知識をもとに、白鑄鉄のサンドエロー

ジョンについて摩耗面における凝固組織との関係に重点をおいて検討した。実験には試作した試験機を用い、砂と水の混合液中で各組成白鑄鉄の耐サンドエロージョン性を調べ、摩耗面の観察にはX線マイクロアナライザーや走査型電子顕微鏡を用いた。その結果、合金元素の種類や量が同じでも、試験条件がcorrosiveな場合（砂40%）には、亜共晶組成よりも共晶組成白鑄鉄の摩耗量が多く、硬さだけで摩耗量が左右されないことがわかった。しかし、C量が同じであれば、基地の耐食性を増加させる元素を含む場合ほど、また、耐食性が同程度であれば基地の硬いほど摩耗量は少なくなる。この場合の摩耗面の状態は、abrasiveよりもcorrosiveな摩耗が優先するような試験条件ほど凹凸が激しくなる。このような試験条件では、基地の腐食によってスケルトン化した炭化物が、砂粒子との衝突により破壊されながら摩耗の進むことが確かめられた。したがって、白鑄鉄における耐サンドエロージョン性の改善では、摩耗条件がcorrosiveな場合ほど、硬さと共に耐食性の増加が必要となる。

## 第6章 高クロム白鑄鉄の凝固組織とサンドエロージョンとの関係

本章では、耐摩耗性の向上に効果知られている $M_7C_3$ 型炭化物を生成し、耐食性もよい高クロム白鑄鉄について、凝固組織及び耐食性とサンドエロージョンとの関係を調べ、摩耗機構も検討した。その結果、abrasiveな試験条件（混合液中の砂の割合を多くする、試験温度を低くする）における15%Cr、3%Ni白鑄鉄の摩耗量は、亜共晶組成よりも過共晶組成試験片の方が多く、その耐サンドエロージョン性は硬さに依存の傾向を示したが、15%Cr白鑄鉄の場合には、C量の多い試験片ほど摩耗量が多く、反対の傾向を示した。これは後者の耐食性が劣るためと考えられる。

corrosiveな試験条件（混合液中の水の割合を多くする、試験温度を上げる、混合液に海水を用いる）では、Niを添加し耐食性を増した白鑄鉄でも、試験片の摩耗面において、基地と炭化物との相境界に腐食を生じれば、両者間の結合力が低下し、脆い炭化物は混合液によって機械的に破壊されながら摩耗の進むことが確かめられた。このような摩耗では、炭化物の破壊が摩耗量や摩耗面の状態に大きく影響することが明らかになった。

## 第7章 高クロム白鑄鉄の熱処理とサンドエロージョンとの関係

abrasiveあるいはcorrosiveな摩耗のいずれが優位な場合でも、耐摩耗材料としての白鑄鉄には、より高い硬さが必要とされ、そのため適当な熱処理を施すのが一般である。一方、熱処理によって硬さが増しても耐サンドエロージョン性が低下するという報告もある。そこで、本章では、前章と同じ15%Cr及び15%Cr、3%Ni白鑄鉄について、熱処理とサンドエロージョンとの関係を検討した。その結果、熱処理によって試料の硬さが増しても耐サンドエロージョン性の低下する傾向は、試験温度が高いほど、あるいは混合液に海水を用いた場合のように試験条件がcorrosiveであるほど顕著にあらわれた。しかも、熱処理（ $425^{\circ}\text{C} \times 8\text{ hr}$  または  $750^{\circ}\text{C} \times 3\text{ hr}$ ）された試験片の摩耗面では、基地と炭化物間の相境界腐食が熱処理しない場合よりも激しい場合があり、このような相境界腐食は、炭化物の機械的な破壊をともしない、摩耗量増加の原因となっ

た。そして、 $750^{\circ}\text{C} \times 3 \text{ hr}$  の熱処理によって基地がマルテンサイト化した白鑄鉄の試験片でも、このような傾向がみられた。

以上から、白鑄鉄の耐サンドエロージョン性を改善するための熱処理は、その耐食性を阻害しない範囲で硬さの増加をはることが必要と考えられる。このような条件を満足させる例として、15% Cr 及び 15% Cr, 3% Ni 白鑄鉄を  $930^{\circ}\text{C} \times 3 \text{ hr}$  熱処理した試験片は、硬さが向上するだけでなく、摩耗量は、abrasive あるいは corrosive な試験条件のいずれでも熱処理しない試験片よりも少なく、耐サンドエロージョン性の改善が明瞭にあらわれた。この場合の基地中には、微細な 2 次炭化物の均一な析出がみられた。

## 第 8 章 総 括

本章では、以上の結果を総括して述べた。

## 審 査 結 果 の 要 旨

白鑄鉄はその組織中に硬い炭化物を多量に含んでいるため、耐摩耗性がよく、とくに高クロム白鑄鉄は耐食性、耐酸化性も優れている。しかし白鑄鉄の凝固組織は複雑で、化学組成、凝固条件などによって敏感に変わり、凝固過程についても明らかでない点が多い。そこで著者はまず一方向凝固方式によって白鑄鉄組織の主体をなすレデブライト共晶の生成機構を研究した。ついでこれらの試験片を円盤上に並列させ、砂と水の混合液中で高速回転させることによってサンドエロージョンの試験を行い、組織との関連を検討した。さらに化学成分、熱処理などの変化による影響も調べた。

本論文はこれらの研究成果をまとめたもので全編8章より成っている。

第1章は緒論で、従来の研究を概説するとともに、本研究の目的と意義を述べている。

第2章ではCr 3%を基準とする白鑄鉄を特殊な砂型中で一方向凝固させ、レデブライト共晶の詳細な検討から、共晶セルの存在を確認したが、これは著者によって始めて提唱されたものである。

第3章ではCr以外の白鑄鉄化元素Mn, Moなどについて研究し、さらに小型実験炉で温度勾配、凝固速度を変化させた場合の共晶組織におよぼす影響について研究した結果を述べている。

第4章では亜共晶組成の合金で初晶オーステナイトと共晶セルの関係を検討し、またデンドライト3次アームの間隔、共晶セル幅などを測定した結果を述べ、さらに初晶、共晶の境界に析出する初析セメンタイトは共晶セル中のセメンタイトの長軸方向と同じになる場合の多いことを確認している。

第5章では試作した試験機により、砂と水との混合液中でのサンドエロージョン試験結果を述べている。abrasiveな摩耗には硬さが優先的に作用するが、corrosiveな摩耗では硬さより耐食性が影響することを試料表面のXMAや走査電顕観察結果から明らかにしている。

第6章では $M_7C_3$ 型炭化物を生ずる15%Cr白鑄鉄およびこれに3%Niを添加した試料についての実験結果を述べ、第7章ではこれらの合金に種々の熱処理を行った場合、ならびにサンドエロージョン試験液に海水を用いた場合についての研究結果を述べている。いずれも930℃、3時間熱処理したものがよく、とくにcorrosiveな条件下では15%Cr、3%Niのものが耐サンドエロージョンにもっとも優れていることを結論している。

第8章は総括である。

以上要するに、本論文はまず白鑄鉄の凝固過程の研究から共晶セルの存在を確かめ、さらにこれを基礎としてサンドエロージョンに対して優れた白鑄鉄を開発したもので、得られた成果は金属工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。